#### DOI: 10.5846/stxb201704070595

成龙,贾晓红,吴波,李元寿,赵雪彬,周虹.高寒沙区生物土壤结皮对吸湿凝结水的影响.生态学报,2018,38(14): - . . Cheng L, Jia X H, Wu B, Li Y S, Zhao X B, Zhou H.Effects of biological soil crusts on the characteristics of hygroscopic and condensate water deposition in alpine sandy lands. Acta Ecologica Sinica, 2018, 38(14): - .

# 高寒沙区生物土壤结皮对吸湿凝结水的影响

成 龙1,贾晓红1,\*,吴 波1,李元寿2,赵雪彬3,周 虹1

1 中国林业科学研究院荒漠化研究所,北京 100091

2 中国气象科学研究院,北京 100081

3 青海共和荒漠生态系统国家定位观测研究站,青海 813000

摘要:高寒沙区,水资源匮乏,吸湿凝结水是维持当地生态环境的重要非生物影响因子。本文采用自制微渗仪(直径 10 cm,高 度分别为3、4、6、11 cm)观测3类生物土壤结皮(苔藓结皮、藻类结皮、物理结皮)和流沙的吸湿凝结水量变化规律。结果表明: 观测期间,除去大风和降雨天气外,吸湿凝结水每天都会产生;不同地表类型产生的吸湿凝结水量存在差异,生物土壤结皮生成 的吸湿凝结水量显著大于流沙上产生的吸湿凝结水(P<0.05),即生物土壤结皮有利于吸湿凝结水的生成;随着结皮的发育,吸 湿凝结水量呈增加趋势,主要表现为:流沙<物理结皮<藻类结皮<苔藓结皮;凝结现象自 19:00 开始,次日 7:00 结束;日出后,吸 湿凝结水量迅速下降,持续时间为5h,其中苔藓结皮与流沙下降速率最快;吸湿凝结水主要集中在土壤表层5 cm 内,达总凝结 量的 90%以上,且观测值变异系数小,可作为代表性土壤深度进行吸湿凝结水的相关研究;吸湿凝结水量与大气温湿度密切相 关,与大气温度呈负相关关系,与大气湿度呈正相关关系;吸湿凝结水量受取样深度、地表类型、大气温湿度等多方面因素的 影响。

关键词:高寒沙区;生物土壤结皮;流沙;吸湿凝结水

# Effects of biological soil crusts on the characteristics of hygroscopic and condensate water deposition in alpine sandy lands

CHENG Long<sup>1</sup>, JIA Xiaohong<sup>1,\*</sup>, WU Bo<sup>1</sup>, LI Yuanshou<sup>2</sup>, ZHAO Xuebin<sup>3</sup>, ZHOU Hong<sup>1</sup>

1 Institute of Desertification Studies, Chinese Academy of Forestry, Beijing 100091, China

2 Chinese Academy of Meteorological Sciences, Beijing 100081, China

3 Qinghai Gonghe Desert Ecosystem Research Station, Gonghe 813000, China

Abstract: Water resource is scarce in alpine sandy areas. Hygroscopic and condensate water is an important abiotic factor in the maintenance of the local ecological environment. In this research, we used micro-lysimeters which has 10 cm in diameter and 3, 4, 6 cm in height to measure the variations of the hygroscopic and condensate water content in three types of biological soil crusts (moss, algae, and physical crusts) and moving sand. The results indicated that hygroscopic and condensate water generated almost every day except the windy and rainy days; contents of hygroscopic and condensate water in biological soil crusts were higher than that in moving sand which indicating that biological soil crusts are conducive for the formation of hygroscopic and condensate water. There was an increasing trend of hygroscopic and condensate water content with the development of soil crusts; sand < physical crusts < algae crusts < moss crusts. Hygroscopic and condensate water content

**基金项目**:国家重点研发计划项目(2016YFC0500801);国家自然科学(41471096,41371093);中央级公益性科研院所基本科研业务费项目(CAF-YBB2016ZD010)

收稿日期:2017-04-07; 网络出版日期:2018-00-00

\* 通讯作者 Corresponding author.E-mail: jiaxiaohong@ caf.ac.cn

http://www.ecologica.cn

occurred from 7:00 pm to 7:00 am in the next day. After sunrise, hygroscopic and condensate water content decreased rapidly within 5 hours. The fastest rate of decrease was found in moss crusts and sand. More than 90% of hygroscopic and condensate water presented in the top of soil within 5 cm which could be used as representative soil depth for further study of hygroscopic and condensate water for low variable coefficient; the contents of hygroscopic and condensate water was negatively correlated with atmospheric temperature and positively correlated with humidity; the hygroscopic and condensate water content was mainly affected by the factors such as sampling depth, surface type, atmospheric temperature, and humidity.

Key Words: alpine sandy lands; biological soil crusts; moving sand; hygroscopic and condensate water

高寒沙区,海拔高、温度低、降水稀少、蒸发量高,形成了独特的自然环境。水分是影响动植物生存与分布 的关键性非生物因子,任何方式的水分来源都可能为高寒沙区生态系统带来积极的影响,在水资源稀缺的区 域,除降水外,吸湿凝结水是重要的水分来源。

荒漠生态系统中生物土壤结皮因其特殊的生理特征,在干旱、半干旱地区扮演了重要的角色,是荒漠生态系统的构建者之一。生物土壤结皮(biological soil crusts, BSCs)以隐花植物(蓝藻、苔藓、地衣和土壤微生物)为主体,土壤表层颗粒与隐花植物生物体假根和生长需要产生的分泌物或是自身的菌丝体胶结,形成的十分复杂的复合体<sup>[1]</sup>。伴随着土地退化、沙化和荒漠化现象的加剧,有关干旱、半干旱地区的研究逐渐增多,BSCs 在这些植被恢复区和荒漠生态系统中广泛分布,在某些地区的覆盖率达到了40%以上<sup>[1-2]</sup>,周期性缺水、缺少维管植物的沙漠、冻原和岩面等,其覆盖率几乎达到了70%。荒漠生态系统中生物土壤结皮吸湿凝结水的研究逐渐引起了重视,相关试验证实了吸湿凝结水的存在,内盖夫沙漠一年有195 d 可以生成吸湿凝结水,吸湿凝结水总量33 mm<sup>[3]</sup>;毛乌素沙地,吸湿凝结水量可占据年均降雨量的12.6%<sup>[4]</sup>。对于灌木、半灌木等需水量较高的植物,吸湿凝结水的存在没有太大意义,且吸收困难,利用价值有限<sup>[5]</sup>,但对于荒漠系统中的各类昆虫<sup>[6]</sup>、微生物、结皮<sup>[78]</sup>等生物来说,是赖以生存的水源之一。此外,吸湿凝结水具有提高荒漠地区植物种子萌芽<sup>[9]</sup>,促进沙丘稳定<sup>[10-11]</sup>等多方面的作用,因此有关荒漠地区吸湿凝结水凝结特征的研究具有十分重要的生态水文意义。

国外对吸湿凝结水的研究在 20 世纪 40 年代就开始进行了,迄今已有 70 余年,吸湿凝结水研究的相关技术已经十分纯熟<sup>[12-13]</sup>,相关理论(影响因素、形成机理等)已经十分完善<sup>[14-17]</sup>。我国相关方面的研究还有一定程度的欠缺,研究主要集中在腾格里沙漠<sup>[18-19]</sup>、古尔班通古特沙漠<sup>[20]</sup>、毛乌素沙地<sup>[4]</sup>等区域<sup>[21]</sup>,鲜见高寒沙区吸湿凝结水的相关报告,与我国的荒漠生态系统分布是不对称的。基于这种现象,本文选择地处于青藏高原的共和盆地,采用微型蒸渗仪观测了青海共和沙地夏秋季节吸湿凝结水形成量及形成过程,分析了采样深度和结皮类型对它们的影响,探讨了吸湿凝结水量同气温和湿度关系,可为高寒沙区生态系统管理及生态水文学研究提供借鉴。

#### 1 研究区概况与研究方法

#### 1.1 研究区概况

研究区位于青海省海南州沙珠玉乡青海省治沙试验站,36°16′N,100°16′E,海拔高度 2871 m,是青海省林 业厅的下属单位。地处于青藏高原东北部的共和盆地,是青海省荒漠化土地的主要分布区,占地面积 5.2×10<sup>2</sup> km<sup>2</sup>,土地沙化面积约为 1.74×10<sup>2</sup> km<sup>2</sup>。所处环境的影响,该区具有明显的高原性大陆气候特征,降水稀少,主 要集中在夏季夜晚,时间短,雨量下,降水十分不均匀,年降水量 246.3 mm;降雨的同时常常伴有大风,平均风 速 3 m/s,主要是西北风;低温且温差大,年平均温度 2.4℃,年最高温度 39℃;光照时间长,年太阳辐射量为 158431×4.18 kJ/cm<sup>2[22]</sup>;蒸发量高,年蒸发量 1716.7 mm。

为治理土地的沙化,青海省治沙实验站于19世纪60年代建成,至今已有60多年的历史,形成了以灌木:

3

柠条锦鸡儿(Caragana korshinskii Kom.)、沙棘(Hippophae rhamnoides Linn)、柽柳(Tamarix chinensis Lour.)为 主,多年生草本:赖草(Leymus)、甘草(Glycyrrhiza uralensis Fisch)、针茅(Stipa capillata Linn.)、早熟禾(Poa annua L.)、等,高大乔木:青杨(Populus cathayana Rehd.)、小叶杨(Populus simonii Carr)、樟子松(Pinus sylvestris var. mongolica Litv.)为辅,同时伴有大面积的苔藓、藻类等隐花植物,形成了复杂的植物群落。研究对 象为生物土壤结皮,生长年限的不同,生物土壤结皮的发育程度不同,随着时间的推移,生物土壤结皮的随着 流沙、物理结皮、藻类结皮、地衣、苔藓结皮的发育顺序进行更替,同时存在一定的伴生现象。本试验对不同年 限的生物土壤结皮厚度进行了调查,综合考虑,研究样地设置在 1977 年植被恢复区。

1.2 研究方法

吸湿凝结水的测量没有统一的方法,微渗仪法是目前公认的较精确的方法之一<sup>[23]</sup>,本试验采用微渗仪法 对吸湿凝结水凝结和蒸散过程进行观测<sup>[24-25]</sup>。

1.2.1 样地设置

研究区地处高寒沙区,未见相关研究报道,2016年6月—2016年10月,利用自制微渗仪对研究区吸湿凝 结水进行了观测,微渗仪由内环和外环两部分组成<sup>[20]</sup>,内环直径10 cm,外环直径15 cm;试验共有4个处理, 每个处理5个重复,选取具有代表性的苔藓结皮、藻类结皮、物理结皮,用流沙作为对照;取样时在不破坏结皮 的前提下,将内环垂直压入土壤,用300目纱网封底,取样高度分别为2、3、5、10 cm(为防止测量过程对样品 的影响,取样样品装至内环顶部1 cm 处)。样品采集与样方设置均需避开灌丛、乔木的影响。

1.2.2 生物土壤结皮吸湿凝结水凝结特征观测

2016年6月15日开始试验,2016年10月8日停止观测,观测过程中,每日19:00和次日7:00用精度为0.01g的电子天平称取样品,两次测量结果的差值即为夜间吸湿凝结水量。测量过程中,选取晴朗无云少风的夜晚进行凝结和蒸散过程的观测,2016年7月19日19:00开始观测,直至样品重量趋于稳定时结束,时间间隔1h。

1.2.3 气象条件观测

在样地安装有 em50(北京力高泰科技有限公司)数据采集器,对空气温湿度进行观测。

1.2.4 数据分析

观测结果以质量表示吸湿凝结水生成量,转换为以高度表示的吸湿凝结水量,计算公式如下:

$$H=10m/\rho\pi r^2$$

式中,H为吸湿凝结水量(mm);m为吸湿凝结水质量即样品重量变化量(g); $\rho$ 为水的密度(g/cm<sup>3</sup>);r为自制 微渗仪半径(cm)<sup>[21]</sup>。

取样过程中,所取样品土壤深度的不同,会影响吸湿凝结水量的观测结果。在腾格里沙漠<sup>[18-19]</sup>、古尔班 通古特沙漠<sup>[20]</sup>、毛乌素沙地<sup>[4]</sup>等区域<sup>[21]</sup>的观测过程中,证实了吸湿凝结水主要集中在土壤3 cm,本试验将 10 cm 取样深度下测得的吸湿凝结水量作为当日吸湿凝结水总量,计算不同取样深度下测得吸湿凝结水生成 量占吸湿凝结水总量比例(图2)。

采用 SPSS(双变量相关性分析、因子分析)和 Excel 进行数据分析与绘图。

### 2 结果与分析

2.1 吸湿凝结水量相关特征分析

观测期间,共测得 59 次吸湿凝结水发生现象,除降雨、大风等不适宜观测的天气外,每天都有吸湿凝结水的产生。

随着取样土壤深度的增加,日吸湿凝结水量逐渐增加;不同地表类型日吸湿凝结水量存在差异(图1)。 取样深度2cm的日吸湿凝结水量,苔藓结皮和藻类结皮高于物理结皮与流沙,但苔藓结皮、藻类结皮、物理结 皮与流沙之间存在差异但并无明显规律;取样深度3cm,日吸湿凝结水量大致呈现为:流沙<物理结皮<藻类 结皮<苔藓结皮,但趋势不明显;而取样深度5、10cm,日吸湿凝结水量表现为:流沙<物理结皮<藻类结皮<苔 藓结皮,且趋势明显。



图1 不同地表类型日吸湿凝结水量变化特征

Fig.1 The daily contents of hygroscopic and condensate water on different sand surface

不同地表类型产生的吸湿凝结水总量存在差异 (图 2)。取样深度 2、5、10 cm 的吸湿凝结水总量表现 为:流沙<物理结皮<藻类结皮<苔藓结皮,吸湿凝结水 量随着结皮发育的程度呈现增加的趋势,且不同地表类 型所产生的吸湿凝结水总量差异显著(P<0.05);生物 土壤结皮产生的吸湿凝结水总量显著大于流沙产生的 吸湿凝结水总量(P<0.05);取样深度 3 cm 的吸湿凝结 水总量表现为:流沙<物理结皮<藻类结皮<苔藓结皮, 其中藻类结皮、物理结皮吸湿凝结水总量差异不显著 (P>0.05),苔藓结皮、流沙与藻类结皮和物理结皮之间 吸湿凝结水量差异显著(P<0.05)。





不同字母之间代表差异显著(P<0.05)

2.2 取样深度与吸湿凝结水的关系

以 10cm 深度的日吸湿凝结水量为当日吸湿凝结水总量,计算不同取样深度日吸湿凝结水生成量占日吸 湿凝结水总量比例的结果表明,不同取样深度的比例变化为 2 cm<3 cm<5 cm,且取样深度 2 cm 和 3 cm 的比 例在观测期呈波动性变化,而 5 cm 深度的比例在整个测定期呈稳定变化趋势(图 3)。取样深度 2 cm 的比例 变异系数在不同地表类型为:苔藓结皮 0.253、藻类结皮 0.259、物理结皮 0.434、流沙 0.415,取样深度 3 cm 变 异系数为:苔藓结皮 0.209、藻类结皮 0.181、物理结皮 0.217、流沙 0.292,取样深度 2 和 3 cm 出观测结果变异 系数较大。取样深度 5 cm 的日吸湿凝结水占日吸湿凝结水总量的比例较高,最低 86.57%,最高达到了 98. 92%,所占比例基本达到了 90%以上,且变异系数较小:苔藓结皮 0.030、藻类结皮 0.030、物理结皮 0.031、流沙 0.029。

不同取样深度对吸湿凝结水总量有影响(图4),但地表类型对吸湿凝结水总量无影响;取样深度2 cm的吸湿凝结水总量与取样深度3、5、10 cm吸湿凝结水量之间差异显著(P<0.05);取样深度3 cm处测得吸湿凝结水总量与取样深度5、10 cm处吸湿凝结水总量之间差异显著(P<0.05);取样深度5 cm处吸湿凝结水总量 与取样深度10 cm吸湿凝结水总量之间差异不显著(P>0.05)。

2.3 不同类型地表的吸湿凝结及蒸散日动态过程

为更好的了解吸湿凝结水凝结与蒸散过程,通过对吸湿凝结水的日动态观测结果表明,不同地表类型吸湿凝结水的凝结和蒸散过程呈现出单峰曲线(图 5),吸湿凝结水量表现为:流沙<物理结皮<藻类结皮<苔藓结皮。取样深度 2 cm 处物理结皮与流沙之间差异不显著(P>0.05),结皮(苔藓结皮和藻类结皮)与流沙之间 差异显著(P<0.05);取样深度 3、5、10 cm 吸湿凝结水量不同地表类型吸湿凝结水量之间差异均显著(P< 0.05)。相同地表类型取样深度 2、3 cm 与取样深度 5 cm 和 10 cm 之间差异显著(P<0.05);取样深度 5 cm 与 10 cm 吸湿凝结水量之间差异不显著(P>0.05)。

凝结过程分为两个阶段(图5),日出前的凝结现象以及日出后的蒸散现象,凝结现象自19:00 开始,至次日7:00 结束,吸湿凝结水量最大值出现在次日7:00;蒸散现象自次日7:00 至次日12:00,持续时间5h, 12:00吸湿凝结水基本已蒸发完。蒸散过程苔藓结皮吸湿凝结水量下降最快,流沙次之,藻类结皮和物理结皮 吸湿凝结水量下降居中。

### 2.4 大气温湿度与日凝结水量之间关系

因吸湿凝结水生成时间为 19:00 至次日 7:00,所以采用该时间段内大气温湿度平均值分析日吸湿凝结 水量与其的相关关系。大气温度降低,湿度升高,吸湿凝结水量增加,大气温度升高,湿度降低,吸湿凝结水量 降低(图 5 和图 6);大气温度与吸湿凝结水量呈负相关关系,大气湿度与吸湿凝结水量呈正相关关系,且相关 性与取样深度和地表类型无关(图 7)。





Fig.3 The hygroscopic and condensate water contents of biological soil crust in different sample depth

## 3 讨论

其他研究表明,吸湿凝结水主要来源于空气和土壤中的水汽,吸湿凝结水量的大小受取样深度、地表类

型、周围植被等因素的影响<sup>[3,18-19]</sup>。在腾格里沙漠沙坡 头区<sup>[1]</sup>、毛乌素沙漠<sup>[3]</sup>和古尔班通古特沙漠<sup>[19]</sup>等地区 吸湿凝结水主要发生在 0—3 cm 内,3—10 cm 土壤深 度,虽然存在吸湿凝结水,但因其凝结量较少,可以忽略 不计<sup>[19-20,26]</sup>。通过对高寒沙区不同地表类型的 2、3、5、 10 cm 土壤深度的吸湿凝结水量研究表明,高寒沙区生 物土壤结皮吸湿凝结水量与所取样品土壤深度密切相 关;土壤 2、3 cm 的吸湿凝结水量波动大,差异明显,不 可作为代表性取样深度;土壤 5 cm 处观测结果占总吸 湿凝结水量(10 cm 土壤深度)的 90%以上,且较为稳 定,可作为代表性取样深度进行试验。在农田生态系统 中,凝结水量较高时,凝结水会出现下渗现象,水分下渗







不同字母之间代表差异显著(P<0.05)

深度较高,所取样品土壤深度低于下渗深度时,就会引起观测结果的不准确;本研究观测的吸湿凝结水量较小,基本保持在土壤浅表层,入渗深度不深。另一方面,取样深度造成观测结果的偏差可能与吸湿凝结水来源 有关,一方面大气温度在没有达到露点温度时就有凝结现象的产生,即来自大气中的水分的吸收凝结部分; 另一方面因土壤温度梯度的影响,深层土壤水分向上转移,并在近地表某一深度的土壤处凝结<sup>[27]</sup>,这一现象 的发生,决定着不同研究区域生物土壤结皮吸湿凝结水的取样深度<sup>[18]</sup>。本研究中,5cm 和 10cm 取样深度形 成的吸湿凝结水量差异不显著,5 cm 取样深度可作为高寒沙区吸湿凝结水相关研究的代表性土壤深度。

吸湿凝结水的凝结、蒸散过程与地表类型密切相关。不同类型的生物土壤结皮因其结构和组成成分的差 异,会对吸湿凝结水量产生不同的影响[19,23,28]。在干旱区或半干旱区生物土壤结皮吸湿凝结水的研究表明: 吸湿凝结水量随结皮发育程度的增加而增加,结皮发育程度越高,吸湿凝结水量越大;生物土壤结皮吸湿凝结 水量显著高于流沙[19,23,28]。吸湿凝结水量的多少受多方面的影响,在古尔班通古特的研究表明夜晚,苔藓结 皮温度下降较快,至近地表温度以下时,空气中水汽在地表凝结;白天增温快,夜晚降温迅速,较大的日夜温差 有利于吸湿凝结水的生成[26];另一方面,研究区藓类结皮属于变水植物,变水的特征决定其含水量随周围环 境的变化而变化,经过一日的高温,空气湿度迅速下降,由于干旱缺水,苔藓植物体皱缩,进入休眠状态,遇到 水分(即使量很少)之后恢复生理活性,恢复活性的苔藓结皮苔藓植物体裸露在结皮表面,与其他类型的结皮 相比具有较大的表面积,在吸湿凝结水形成过程中捕捉空气中水分具备更大的优势;凝结面机械组成也会影 响吸湿凝结水的形成,土壤粉粒和黏粒等细颗粒物含量越高,凝结面表面捕水的毛管作用力越大,即越有利于 吸湿凝结水的形成,在鄂尔多斯沙地的研究证明,随着结皮的发育程度的增高,土壤粉粒和黏粒等细颗粒物含 量随之增加<sup>[29]</sup>。苔藓结皮较大的表面积、较高的日温差和较高的细颗粒物含量都有利于吸湿凝结水的产生, 本研究结果也表明夜间苔藓结皮的吸湿凝结水量最大。藻类结皮、物理结皮和流沙与苔藓结皮相比具备空气 接触面积小和土壤细颗粒物少的特点,而在这三者之中,接触面积:藻类结皮>物理结皮>流沙,土壤细颗粒物 含量:藻类结皮>物理结皮>流沙<sup>[29]</sup>,这导致吸湿凝结水量:藻类结皮>物理结皮>流沙。本研究中,吸湿凝结 水量:苔藓结皮>藻类结皮>物理结皮>流沙,与腾格里沙漠沙坡头区<sup>[1]</sup>、毛乌素沙漠<sup>[3]</sup>和古尔班通古特沙 漠<sup>[19]</sup>等地区吸湿凝结水相关研究结果一致。

吸湿凝结水的蒸散过程中,一方面苔藓结皮与其他类型结皮相比具备增温速度快,空气接触面积大等特点;另一方面苔藓结皮具备明显植物体,夜间产生的吸湿凝结水附着在植物体表面,日出后,吸湿凝结水直接暴露于空气中,有利于吸湿凝结水的蒸发,综合导致苔藓结皮蒸散速率高于其他结皮类型。藻类结皮,是由藻类菌丝体与土壤颗粒胶结形成的薄膜,由于其特殊的水分运移方式,产生的吸湿凝结水转移到土壤表层的下方<sup>[3]</sup>;相关研究证明,日出时,温度与水分适宜,藻类恢复生理活性,藻丝体从胶鞘游至表层,进行生理代谢活动,随着表层温度的升高,为避免水分的散失,藻丝体退至土壤下层<sup>[23]</sup>,特殊的水分运移方式和特殊的藻丝体





http://www.ecologica.cn









图 7 大气温湿度与吸湿凝结水量相关性

Fig.7 Correlations between hygroscopic and condensate water contents and atmospheric humiture

运动方式可能是藻类结皮吸湿凝结水持续时间较长的原因。物理结皮是土壤颗粒板结所形成的一种特殊的 结皮类型,其上部未见明显的植物存在,由于表层的板结,对水分的运输起到了一定的阻碍作用,吸湿凝结水 产生后,渗入物理结皮下层,致使吸湿凝结水的蒸发速度较慢。而流沙的土壤孔隙大,持水能力差,表层与近 地表温度升高,吸湿凝结水迅速蒸发<sup>[26]</sup>。本研究中,吸湿凝结水蒸发速率:苔藓结皮>流沙>物理结皮>藻类 结皮。

#### 4 结论

通过对处于高寒沙区共和盆地开展吸湿凝结水凝结特征的初步观测,得到以下结论:

不同地表类型产生的吸湿凝结水表现规律如下:流沙<物理结皮<藻类结皮<苔藓结皮,生物土壤结皮吸湿凝结水量显著大于流沙(P<0.05);

在该地区吸湿凝结水主要集中在土壤表层 5 cm 处,取样深度 5 cm 可作为高寒沙区吸湿凝结水研究的代表性土层;

吸湿凝结水产生时间在 19:00 至次日 7:00,持续时间为 7:00—12:00,持续时间 5 h,吸湿凝结水产生与 持续时间与地表类型和取样深度无关;

吸湿凝结水量与大气温湿度密切相关,与大气温度呈正相关关系,与大气湿度呈负相关关系。

#### 参考文献(References):

- [1] 李新荣,张元明,赵允格.生物土壤结皮研究:进展、前沿与展望.地球科学进展,2009,24(1):11-24.
- [2] Evenari M. Ecology of the Negev Desert, a critical review of our knowledge//Shuval H I, ed. Developments in Arid Zone Ecology and Environmental Quality. Philadelphia: Balaban International Science Services, 1981: 1-33.
- [3] 张晓影,李小雁,王卫,马育军. 毛乌素沙地南缘凝结水观测实验分析. 干旱气象, 2008, 26(3): 8-13.
- [4] 王新平,李新荣,康尔泗,张景光,周海燕,杨诗秀,雷志栋.腾格里沙漠东南缘人工植被区降水入渗与再分配规律研究.生态学报, 2003,23(6):1234-1241.
- [5] Moffett M W. An Indian ant's novel method for obtaining water. National Geographic Research, 1985, 1(1): 146-149.
- [6] Kidron G J, Yair A, Danin A. Dew variability within a small arid drainage basin in the Negev Highlands, Israel. Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society, 2000, 126(562): 63-80.
- [7] Broza M. Dew, fog and hygroscopic food as a source of water for desert arthropods. Journal of Arid Environments, 1979, 2: 43-49.
- [8] Gutterman Y, Shem-Tov S. Mucilaginous seed coat structure of *Carrichtera annua* and *Anastatica hierochuntica* from the Negev Desert highlands of Israel, and its adhesion to the soil crust. Journal of Arid Environments, 1997, 35(4): 695-705.
- [9] Subramaniam A R, Kesava Rao A V R. Dew fall in sand dune areas of India. International Journal of Biometeorology, 1983, 27(3): 271-280.
- [10] Agam N, Berliner P R. Dew formation and water vapor adsorption in semi-arid environments——A review. Journal of Arid Environments, 2006, 65 (4): 572-590.
- [11] Boast C W, Robertson T M. A "micro-lysimeter" method for determining evaporation from bare soil: description and laboratory evaluation. Soil Science Society of America Journal, 1982, 46(4): 689-696.
- [12] Kidron G J. A simple weighing method for dew and fog measurements. Weather, 1998, 53(12): 428-433.
- [13] Kidron G J. Altitude dependent dew and fog in the Negev Desert, Israel. Agricultural and Forest Meteorology, 1999, 96(1/3): 1-8.
- [14] Kidron G J. Analysis of dew precipitation in three habitats within a small arid drainage basin, Negev Highlands, Israel. Atmospheric Research, 2000, 55(3/4): 257-270.
- [15] Kidron G J. Angle and aspect dependent dew and fog precipitation in the Negev desert. Journal of Hydrology, 2005, 301(1/4): 66-74.
- [16] Garratt J R, Segal M. On the contribution of atmospheric moisture to dew formation. Boundary-Layer Meteorology, 1988, 45(3): 209-236.
- [17] 陈荷生,康跃虎.沙坡头地区凝结水及其在生态环境中的意义. 干旱区资源与环境, 1992, 6(2): 63-72.
- [18] 潘颜霞, 王新平, 张亚峰, 虎瑞. 沙坡头地区地形对凝结水形成特征的影响. 中国沙漠, 2014, 34(1): 118-124.
- [19] 陈荣毅,魏文寿,王敏仲,买买提艾力.买买提依明.古尔班通古特沙漠地表土壤凝结水形成影响因素分析.沙漠与绿洲气象,2015,9 (1):1-5.
- [20] 王哲,梁煦枫,王德建,王杰,王丽娟.鄂尔多斯风沙滩地区土壤凝结水试验研究.地下水,2006,28(6):28-31.
- [21] 李锋, 孙司衡. 景观生态学在荒漠化监测与评价中应用的初步研究——以青海沙珠玉地区为例. 生态学报, 2001, 21(3): 481-485.
- [22] Agam N, Berliner P R. Diurnal Water Content Changes in the bare soil of a coastal desert. Journal of Hydrometeorology, 2004, 5(5): 922-933.
- [23] 方静, 丁永建. 荒漠绿洲边缘凝结水量及其影响因子. 冰川冻土, 2005, 27(5): 755-760.
- [24] 郭占荣,韩双平.西北干旱地区凝结水试验研究.水科学进展, 2002, 13(5): 623-628.
- [25] 范高功.凝结水形成的试验研究及生态环境效应分析.西安工程学院学报,2002,24(4):63-66.
- [26] 张静,张元明,周晓兵,张丙昌,魏美丽. 生物结皮影响下沙漠土壤表面凝结水的形成与变化特征. 生态学报, 2009, 29(12): 6600-6608.
- [27] 钱连红,李洪波,张国盛,王林和,斯庆毕力格,张兴源. 毛乌素沙地三种下垫面土壤吸湿凝结水量的比较.干旱区资源与环境,2009, 23(3):122-125.
- [28] 刘新平,何玉惠,赵学勇,李玉霖,李玉强,李衍青,李世民.科尔沁沙地不同生境土壤凝结水的试验研究.应用生态学报,2009,20
  (8):1918-1924.
- [29] 崔燕,吕贻忠,李保国.鄂尔多斯沙地土壤生物结皮的理化性质.土壤,2004,(02):197-202.

38 卷